



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**ANALÝZA AKUSTICKÝCH VLASTNOSTÍ INOVO-  
VANÝCH MATERIÁLŮ NA BÁZI DŘEVA**

THE ANALYSIS OF ACOUSTIC PROPERTIES OF INNOVATIVE WOOD-BASED MATERIALS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Jan Svojanovský

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

**BRNO 2020**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Audio inženýrství**  
specializace Zvuková produkce a nahrávání  
Ústav telekomunikací

**Student:** Jan Svojanovský

**ID:**203746

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2019/20

## NÁZEV TÉMATU:

### **Analýza akustických vlastností inovovaných materiálů na bázi dřeva**

#### **POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Ve spolupráci s Ústavem nauky o dřevě a dřevařských technologiích na Mendelově univerzitě změřte akustické vlastnosti inovovaných materiálů: tepelně modifikovaného smrku a buku, acetylovaného buku, vrstveného javoru ad. Zaměřte se na rychlost zvuku ve dřevě, Youngův modul pružnosti, útlum, odpor, akustickou konstantu, rezonanční křivku, ale také na impedanční vlastnosti inovovaných materiálů. Získaná akustická data dejte do souvislosti s mechanickými vlastnostmi materiálů a navrhnete případné změny pojidél či povrchových úprav.

#### **DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] Syrový, V.: Hudební akustika. Praha: AMU, 2003. ISBN 978-80-7331-127-8.

[2] Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., Babiak, M: Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vyd. Bratislava: Príroda, 1997. 485 s. ISBN 80-07-00960-4

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 8.6.2020

**Vedoucí práce:** MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

**doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.**

předseda rady studijního programu

#### **UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

# Bachelor's Thesis

Bachelor's study program **Audio Engineering**  
specialization Zvuková produkce a nahrávání  
Department of Telecommunications

**Student:** Jan Svojanovský

**ID:** 203746

**Year of study:** 3

**Academic year:** 2019/20

## TITLE OF THESIS:

**The analysis of acoustic properties of innovative wood-based materials**

## RECOMMENDED LITERATURE:

[1] Syrový, V.: Hudební akustika. Praha: AMU, 2003. ISBN 978-80-7331-127-8.

[2] Požgaj, A. , Chovanec, D., Kurjatko, S., Babiak, M: Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vyd. Bratislava: Príroda, 1997. 485 s. ISBN 80-07-00960-4

## Date of project

**specification:** 3.2.2020

**Deadline for submission:** 8.6.2020

**Supervisor:** MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

**doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.**  
Chair of study program board

## WARNING:

The author of the Bachelor's Thesis claims that by creating this thesis he/she did not infringe the rights of third persons and the personal and/or property rights of third persons were not subjected to derogatory treatment. The author is fully aware of the legal consequences of an infringement of provisions as per Section 11 and following of Act No 121/2000 Coll. on copyright and rights related to copyright and on amendments to some other laws (the Copyright Act) in the wording of subsequent directives including the possible criminal consequences as resulting from provisions of Part 2, Chapter VI, Article 4 of Criminal Code 40/2009 Coll.

## Abstrakt

Obsahem práce je zkoumání inovačních materiálů na bázi dřeva z akustického hlediska, tedy vliv vnitřní struktury daného dřevěného materiálu na veličiny jako rychlost šíření zvuku, jeho akustický odpor nebo na jeho akustickou konstantu.

Cílem bylo posoudit vzorky, každý vyroben a zpracován jiným způsobem. Byly změřeny hmotnosti a rozměry vzorků. Pomocí ultrasonic timeru byly změřeny časy zvukových impulzů procházejících všemi vzorky ve všech jejich osách, aby byl pozorovatelný vliv vláken na rychlost zvuku v materiálu. Dále se určily ostatní veličiny popisující akustiku materiálu. Všechno měření probíhalo za pokojových podmínek (pokojové vlhkosti), šest náhodných vzorků bylo přeměřeno po dvou týdnech umístěných v klimatizaci s výrazně menší vlhkostí vzduchu.

V závěru byly všechny vzorky porovnány jak mezi sebou, tak i s materiály běžně používanými na výrobu hudebních nástrojů nebo akustických prvků. Ke každému vzorku bylo připsáno případné využití v hudebním odvětví.

## Abstract

The content of this work is research of innovative wood-based materials in the acoustic perspective. Basically, the goal is to determine the influence of the internal structure of the wood-based material on variables, which are sound speed, acoustic resistance, or acoustic constant.

In total were measured 15 samples, each one was made in a different way. Each sample was weighted, and the length of its sides was measured. By using the ultra sonic timer, it was measured the time of the sound impulses, which go through the samples in all of their axes for the purpose of observation the influence the fibers on speed of sound in the material. The next thing to do was to determine another magnitude, which describe acoustic of the material. All measurements were taken in room conditions (room humidity). Six of the samples, which were randomly selected from those 15 samples, were measured once again after two weeks. In those two weeks were all the samples saved in air-conditioned place in which was the room humidity distinct lower.

In the end all the samples were compared with each other and they were also compared with materials which are commonly used in production of musical instruments or acoustic components. Possible use in the music industry was assigned to each sample.

## Klíčová slova

Dřevo, akustika, Youngův modul pružnosti, akustický odpor, akustická konstanta, MDF, překližka, akustická dřeva, smrk, překližka

## Key words

Wood, acoustic, Young's modulus, acoustic impedance, acoustic constant, MDF, plywood, acoustic wood, spruce, plywood

## Bibliografická citace

SVOJANOVSKÝ, Jan. *Analýza akustických vlastností inovovaných materiálů na bázi dřeva*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125868>.  
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ondřej Jirásek.

## Prohlášení o původnosti práce

*„Prohlašuji, že svou diplomovou (bakalářskou) práci na téma: „Analýza akustických vlastností inovovaných materiálů na bázi dřeva“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho diplomové (bakalářské) práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.*

*Jako autor uvedené diplomové (bakalářské) práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové (bakalářské) práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.*

V Brně dne:

.....  
podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce MgA. Mgr. Ondřeji Jiráskovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne:

.....  
podpis autora



# Obsah

1.	Úvod .....	10
2.	Rezonanční dřeva .....	11
2.1	Parametry .....	11
2.1.1	Letokruhy.....	11
2.1.2	Umístění .....	11
2.1.3	Chyby dřevin.....	12
2.1.4	Ostatní .....	12
2.2	Druhy rezonančních dřev .....	12
3.	Měření pomocí Ultrasonic timeru .....	14
3.1	Popis .....	14
3.2	Měření .....	14
3.3	Výpočty.....	14
3.4	Vzorky.....	17
3.4.1	Bukový laminovaný panel s postranním lepením.....	17
3.4.2	Betonové bednění .....	18
3.4.3	MDF krytý hliníkovou fólií.....	19
3.4.4	Acetylované dřevo.....	20
3.4.5	MDF barvený – oranžová.....	21
3.4.6	MDF barvený – modrá.....	22
3.4.7	Vrstvené dřevo (LVL) .....	23
3.4.8	Překližka.....	24
3.4.9	Březová překližka s fenolickou fólií .....	25
3.4.10	Bambusový panel .....	26
3.4.11	MDF (Medium density fibreboard) .....	27
3.4.12	Dřevotříska .....	28
3.4.13	Buková překližka.....	29
3.4.14	Smrkový třívrstvý panel.....	30
3.4.15	Paropropustný MDF .....	31
3.5	Vzorky se sníženou vlhkostí vzduchu .....	32
3.5.1	Bukový laminovaný panel s postranním lepením.....	32
3.5.2	MDF krytý hliníkovou fólií.....	32
3.5.3	MDF barvený – modrá.....	33
3.5.4	Vrstvené dřevo (LVL) .....	33
3.5.5	Březová překližka s fenolickou fólií .....	34

3.5.6	Smrkový třívrstvý panel .....	34
3.6	Porovnání .....	34
4.	Závěr .....	39
5.	Seznam použitých zdrojů Aktualizovat.....	40
6.	Seznam použitých zkratk, veličin a symbolů .....	42
6.1	Zkratky .....	42
6.2	Veličiny a symboly .....	42
7.	Seznam obrázků .....	43
8.	Seznam tabulek .....	43

## 1. Úvod

Práce se zabývá vnitřní strukturou inovovaných materiálů na bázi dřeva z akustického hlediska. Dřevo se využívá na konstrukci mnoha druhů hudebních nástrojů nebo akustických prvků v divadlech či koncertních sálech, v nahrávacích studiích nebo na výrobu reproduktorových skříní a dalších věcí z hudebního světa, proto je potřeba, aby mělo takové vlastnosti, které budou podporovat vyzařování zvuku o slyšitelné intenzitě a věrohodné barvě, nebo aby naopak měli vlastnosti, které šíření zvuku podporovat nebudou, ale zvukové vlny budou tlumit. Tyto vlastnosti jsou ovlivněny právě vnitřní strukturou dřeva, jako jeho hustota, nedokonalosti ve dřevě (suky, praskliny, ...) či dřevěnými vlákny. Zda se materiál hodí k hudebnímu použití se dá určit několika způsoby. Dají se změřit zvukové vodivostní parametry (rychlost šíření zvukových vln), ze kterých lze určit např. Youngův modul pružnosti, akustický odpor apod. (obsah semestrální práce), nebo pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT z angl. Fast Fourier Transformation) určit harmonické frekvence tónu v měřeném materiálu a poté jeho rezonanční a zvukové vlastnosti.

Práce pojednává o inovačních materiálech, které nejsou typické pro hudební průmysl a nezpracovávají se obvyklými způsoby jako běžně užívané materiály. Podstatou bakalářské práce je změřit základní údaje (hmotnost, rozměry, ...) připravených vzorků a dále pomocí měřicího přístroje ultrasonic timer změřit čas, který je potřebný k výpočtu rychlosti zvuku v každém vzorku, ze které lze odvodit další veličiny popisující akustické vlastnosti dřeva.

V bakalářské práci se také zaměřuji na popis akustických (rezonančních) dřevěných materiálů, respektive materiálů běžně používaných v hudebním odvětví. To je důležité pro srovnání s inovativními dřevěnými materiály, protože u nich chceme dosáhnout stejných nebo alespoň podobných vlastností, jako u akustických (rezonanci podporujících) materiálů, nebo na druhé straně materiálů s velkým akustickým odporem, které by šíření zvukových vln bránily. Toto srovnání pak pomůže určit, k jakým účelům by se mohly dát využít jednotlivé dřevěné materiály z hudebního hlediska.

## 2. Rezonanční dřeva

Dřevo vždy bývalo základním materiálem pro výrobu hudebních nástrojů. Dáno to bývalo a pořád je především jeho dostupností, přeci jenom se stačí podívat z okna, a pokud nebydlíte uprostřed města, nějaký strom zcela určitě uvidíte. S dostupností šly ruku v ruce akustické (rezonanční) vlastnosti dřeva, protože v přírodě nenaleznete mnoho materiálů, které by byly po jednoduché úpravě schopny produkovat zvuk, tóny, hudbu. V dnešní době lze připsat také další parametr. Tím je tradiční vzhled. Dnes je už totiž možné vyrobit hudební nástroj ze syntetických materiálů a zároveň dosahovat téměř stejných hudebních vlastností těch dřevěných. Hudebníci jsou však zvyklí používat dřevěné nástroje, které jsou navíc kolikrát i hezčí, než nástroje plastové (umělé), proto i nadále setrvávají.

Na výrobu kvalitních dřevěných hudebních nástrojů je však potřeba, aby dřevo, které je k výrobě použito, splňovalo mnoho parametrů zajišťujících správnou rezonanci v žádoucím směru bez dalších parazitních jevů. Tyto parametry jsou podrobně rozebrány v kapitole 2.1.

Udává se, že na jeden strom (který splňuje vlastnosti rezonančního stromu) připadá asi osm procent rezonančního dřeva a zbytek je využit k jiným účelům.

### 2.1 Parametry

#### 2.1.1 Letokruhy

Základem letokruhů u rezonančních dřev je, aby byly dostatečně husté a zároveň pravidelné. Vzdálenost mezi jednotlivými léty by neměla překročit čtvrt centimetru.<sup>1</sup> Je však také potřeba, aby dřevo mělo určitou velikost (například aby část nástroje, třeba tělo kytary, nebyla složena z příliš mnoha kusů), proto nelze využít pro tyto potřeby celý strom, ale vždy pouze jeho část. Rezonanční vrstva dorůstá na stromech pomalu, u smrků například až po 120. roce života, často tak dochází k předčasnému kácení stromů s rezonančními vlastnostmi.

U letokruhů se rovněž sleduje, kolik procent z celkového množství letokruhů je letních a jarních (letní dřevo, jarní dřevo) z toho důvodu, že jarní dřevo má menší hustotu než dřevo letní. Například u smrkového dřeva platí, že jarní dřevo má hustotu asi  $350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , zatímco letní dřevo je více než dvakrát hustší (asi  $870 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).<sup>2</sup> Dále v práci je vidět, jak velký vliv hustota na šíření zvuku uvnitř dřeva má.

#### 2.1.2 Umístění

Umístění rezonančního stromu souvisí s letokruhy, respektive s růstem stromu. Rezonanční stromy nesmí stát na kraji ale uprostřed lesa, nejlépe na severní straně svahu tak, aby se k nim nedostalo příliš mnoho světla, které by urychlilo jejich růst. To by způsobilo, že by vzdálenosti mezi letokruhy neodpovídaly požadavkům.<sup>3</sup> Tyto stromy rostou většinou v nadmořské výšce větší než 500 metrů nad mořem.<sup>4</sup> V Česku rostou rezonanční smrky například v pralesích v šumavském národním parku (kde je těžba kvůli ochraně přírody zakázána), všeobecně však jejich zásoby ubývají a místní výrobci hudebních nástrojů jsou tak odkázáni na dovoz rezonančního dřeva ze zahraničí.

---

<sup>1</sup> (Bohdalová, 2019)

<sup>2</sup> (Požgaj, 1997, str. 168)

<sup>3</sup> (Kerles, 2016)

<sup>4</sup> (Šarounová, 2019)

### 2.1.3 Chyby dřevin

Dále je důležité, aby rezonanční dřevo bylo bez vad, které by znehodnocovaly jeho akustické vlastnosti. Je například nutné, aby ve spodní části kmene rezonančního stromu nebyly žádné suky, ty by měly za následek nepravidelnou strukturu letokruhů a dřevo by nesplňovalo správné požadavky pro rezonanci<sup>5</sup>. Suky vznikají na stromech přirozeně během růstu stromu jako základy větví v kmeni a jsou plynule spojeny s letokruhy v kmeni.

V kmeni mohou vznikat také trhliny. Dochází k tomu při růstu stromů, při jejich těžbě a následné manipulaci nebo během vysoušení.

Můžeme se setkat také s chybami ve tvaru kmene stromu. Sem patří například křivost kmene (vyskytující se hlavně u listnatých stromů). Zkřivení (v podélném směru) může být jednostranné (ohyb kmene směřuje pouze na jednu stranu), více směrné (kmen má tvar písmene S) nebo spirálovité. Mezi chyby ve tvaru kmene patří také sbíhavost kmene (postupné zužování kmene) nebo nádory (výrůstky na kmeni vzniklé reakcí na různá podráždění nebo poškození kmene, vyvolané houbami, mrazem, zvířaty apod.).<sup>6</sup>

### 2.1.4 Ostatní

Je potřeba zmínit, že rezonanční dřeva se vysouší zásadně přirozenou cestou – to znamená bez použití sušiček nebo jiných umělých způsobů na urychlení vysoušení dřeva. V zásadě se musí rezonanční dřevo umístit do prostor, kde je chráněno před deštěm a přímým světlem (sluncem).<sup>7</sup> Dále se při výběru dřeva na různé nástroje a různé části hudebních nástrojů sledují parametry jako tvrdost nebo pružnost. Některým z parametrů ovlivňujících šíření zvuku ve dřevě se věnuje kapitola 3.3.

## 2.2 Druhy rezonančních dřev

Mezi nejčastěji používané rezonanční dřevo patří u nás dřevo smrkové. Zejména kvůli hojnosti a rychlosti růstu v porovnání s jinými, v Česku běžně rostoucími dřevinami. Ze smrků se hudební nástroje vyráběly už od nepaměti není tedy kupodivu, že tato tradice přetrvává i dodnes. Smrkové dřevo se dnes už stalo základním materiálem pro výrobu kytar (akustických i elektrofonických), houslí, violoncell a jiných smyčcových nástrojů – přesněji řečeno pro výrobu ozvučných desek těchto nástrojů. Rezonanční smrky se používají také k výrobě rezonančních desek klavírů. Velmi kvalitní rezonanční smrky rostou v oblasti Alp (konkrétně Itálie, Rakousko). Dalším, často používaným druhem dřeva pro výrobu vrchních desek kytar je cedr (rozdíly jsou především v barevných odstínech, kdy smrkové dřevo je světlé a cedrové tmavé).

Pro výrobu spodních desek kytar a jiných strunných, nebo i smyčcových nástrojů, se používají tvrdá, často exotická dřeva. Mezi ta nepoužívanější pak patří palisandr, který je však z důvodu ochrany přírody už těžko k sehnání, jacaranda typická svoji rozmanitou kresbou nebo mahagon. Ze dřev pocházejících z našeho území, se používá hlavně javor. Ten lze nahradit třeba třešní, hruškou, ořechem a jinými. Některé levné hudební nástroje (hlavně strunné) jsou dokonce vyrobeny z překližek nebo jiného vrstveného dřeva. Ty však nedosahují zdaleka takové hudební kvality jako nástroje zhotovené z drahých rezonančních dřev.<sup>8</sup>

---

<sup>5</sup> (Šarounová, 2019)

<sup>6</sup> (Požgaj, 1997, stránky 123–130)

<sup>7</sup> (Šámal, 2019)

<sup>8</sup> (Malý & Popp, 2004)

Části nástrojů jako jsou krk nebo kobylka, se vyrábějí z jednoho kusu tvrdého dřeva (nejčastěji opět mahagon, eben, palisandr).

Dýchací dřevěné hudební nástroje, například hoboj nebo klarinet, bývají nejčastěji vyrobeny z granadilly (africké tropické dřevo) nebo jí podobnému ebenu. Flétny bývají z hrušky, javoru nebo palisandru.<sup>9</sup>

Použití dřevěných materiálů se liší podle osobních preferencí – jak hudebních (každému zní líp něco jiného pro odlišné hudební žánry), tak vzhledových (dřeva mají nejrozličnější barevné kresby a někteří hudebníci jsou schopni pro hezčí vzhled nástroje slevit z jeho hudebních kvalit), proto nelze přesně říci, které dřevo je nejvhodnější – každé má různé kvality v nejrozličnějších, nejen hudebních směrech.

V některých případech ani není požadováno, aby bylo dřevo rezonanční. Naopak je potřeba, aby mělo velkou hustotu a velký akustický odpor, které brání šíření zvuku nebo rozkmitání dřeva. Tvorbě těchto jevů je potřeba zabránit například u reproduktorů, kde by mohlo docházet k interferenci (sčítání) zvukových vln vyzářených přední stranou reproduktoru a vln, které po vyzáření zadní stranou reproduktoru projdou stěnami ozvučnice. Podobně není někdy žádoucí, aby pronikal zvuk z místnosti do jiné (vedlejší) místnosti, kde by opět mohlo docházet k rušení žádoucího zvuku. Zdi se pak pokrývají nebo dokonce vyplňují zvukotěsnými materiály.<sup>10</sup>

---

<sup>9</sup> (wikipedia, 2020)

<sup>10</sup> (LuKyss, 2008)

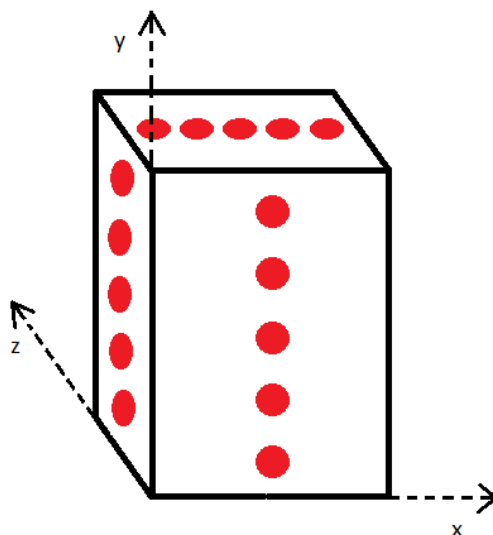
### 3. Měření pomocí Ultrasonic timeru

#### 3.1 Popis

Jedná se o elektronický přístroj vyráběný firmou Fakopp. K přístroji jsou připojeny dvě sondy, jedna z nich vysílá impuls, druhá jej zaznamenává a přístroj jako takový pak měří dobu od vyslání k zaznamenání impulsu. Změřený časový údaj se zobrazuje na digitální obrazovce. Doba zaznamenání impulsu se liší v závislosti na vlastnostech materiálu (vnitřní struktura, vlhkost, ...), který se mezi sondy umístí. Technické specifikace měřícího přístroje jsou dostupné na webové stránce Fakopp (dostupné z: <https://fakopp.com/en/product/ultrasonic/>).<sup>11</sup>

#### 3.2 Měření

Při měření jsem umístil daný dřevěný kvádr mezi sondy, které jsem vždy přikládal na jeho strany (viz obr. 1). Pokaždé na pět pozic, abych zjistil, zda se bude rychlost impulsu v určité ose lišit, v závislosti na umístění sond. Všechny vzorky byly měřeny ve 20 °C při vlhkosti vzduchu asi 60 % (pokojové podmínky).<sup>12</sup>



Obr. 3.1 Znáznornění měření doby od vyslání k záznamu impulsu pomocí timeru

#### 3.3 Výpočty

Pro každou měřenou stranu kvádrového vzorku (vždy jednu stranu tak, abych neměřil i její protější stranu, protože by byly výsledky shodné (červené body na obr. 1 značí místa přikládání sondy, která impuls vysílala, na protější straně byla umístěna sonda, která jej zaznamenávala)), jsem vypočítal průměrný čas z pěti měření:

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_i, \quad (2.1)$$

kde  $n$  je počet měření a  $t$  změřený čas.

<sup>11</sup> Když mezi sondami nebylo nic umístěno a sondy byly těsně u sebe, zobrazoval displej timeru čas 12  $\mu$ s.

<sup>12</sup> (Topinfo s.r.o, 2001 - 2019)

Z tohoto času jsem následně určil průměrnou rychlost šíření zvuku pro každou osu vzorku:

$$v = \frac{s}{t}, \quad (2.2)$$

kde  $s$  je délka měřené strany vzorku. Tato rychlost se u dřeva liší v závislosti na směru šíření zvuku. Ve směru vláken je rychlost větší než proti vláknům. Na rychlost šíření zvuku má vliv také tlak, teplota a vlhkost dřeva<sup>13</sup> (viz kapitola 3.5).

Pro každý vzorek jsou v tabulkách (např. tab. 2.1) v prvním sloupci uvedeny jeho rozměry a hmotnost. Z nich lze vypočítat objem ze znalosti změřených stran  $s_x$ ,  $s_y$ ,  $s_z$ :

$$V = s_x \cdot s_y \cdot s_z \quad (2.3)$$

a hustota tělesa:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (2.4)$$

kde  $m$  je jeho hmotnost a  $V$  objem.

Důležitá veličina udávající vnitřní odpor materiálu proti deformaci, která odpor způsobila je modul pružnosti. Rozlišujeme moduly pružnosti při tangenciálních namáháních (kroucení, smyk)  $G$ , normálových namáháních (tah, tlak, ohyb)  $E$  (Youngův modul pružnosti) a další.

$$E = v^2 \cdot \rho. \quad (2.5)$$

Čím větší Youngův modul pružnosti je, tím je potřeba většího napětí na vyvolání deformace v materiálu<sup>14</sup>. Modul pružnosti v tahu je závislý na kvadrátu rychlosti zvukové vlny  $v$  a na hustotě materiálu  $\rho$ , kterým se vlna šíří.

Každý materiál má odlišný odpor proti šíření podélné zvukové vlny (zvuk se tlumí vzájemným třením částic dřeva a vyzařováním části energie zvuku). Odpor, způsobený vnitřním třením částic dřeva, se nazývá akustický vlnový odpor ( $Z$ ) a je dán součinem hustoty materiálu  $\rho$  a rychlostí šíření zvukové vlny  $v$  v něm:

$$Z = \rho \cdot v, \quad (2.6)$$

tlumení způsobené radiací zvuku lze vyjádřit poměrem rychlosti zvuku v daném materiálu a jeho hustoty. U hudebních nástrojů, například u rezonančních desek pianin, je vyžadováno, aby byl odpor způsobený vnitřním třením co nejmenší a tlumení vyzařováním naopak co největší.<sup>15</sup>

---

<sup>13</sup> (Požgaj, 1997, str. 270)

<sup>14</sup> tamtéž, str. 324

<sup>15</sup> tamtéž, str. 272, 274



Pro dobrý zvuk hudebních nástrojů je potřeba, aby se energie, dodaná nástroji (brnknutí struny), přeměnila v co největší míře na vyzařenou energii (zvuk z ozvučnice) a aby byly vnitřní ztráty (vnitřní tření) co nejmenší. Jak moc je dřevo schopno vyzařovat nám říká také akustická konstanta (konstanta vyzařování):

$$K_A = \sqrt{\frac{E}{\rho^3}}, \quad (2.7)$$

kde  $E$  je modul pružnosti v tahu (Youngův modul pružnosti) a  $\rho$  je hustota daného materiálu.

Rezonanční schopnost dřeva je zesilování zvuku bez způsobení jeho zkreslení. Jako rezonanční dřevo se pak bere dřevo, jehož akustická konstanta dosahuje velikosti alespoň  $12 \text{ m}^4 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  (akustická konstanta rezonančního smrku). Konstantu vyzařování ovlivňuje nepravidelné uspořádání vláken, hustota letokruhů, poměr mezi letním a zimním dřevem a další parametry, které jsou podrobně popsány v kapitole 2.1.<sup>16</sup>

---

<sup>16</sup> (Požgaj, 1997, str. 275)

### 3.4 Vzorky

#### 3.4.1 Bukový laminovaný panel s postranním lepením

Tab. 3.1: Změřené hodnoty pro laminovaný bukový panel

Změřené hodnoty								
$m$ [g]	85,491	pozice	1	2	3	4	5	$\bar{t}$
$s_x$ [mm]	73,5	$t_x$ [μs]	58	52	53	53	53	53,8
$s_y$ [mm]	105,5	$t_y$ [μs]	24	23	23	24	24	23,6
$s_z$ [mm]	17,5	$t_z$ [μs]	12	12	12	12	12	12
$V$ [m <sup>3</sup> ]	0,000136	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	630,0					

Tab. 3.2: Vypočítané hodnoty pro laminovaný bukový panel

Vypočítané hodnoty			
$v$	$E$	$Z$	$K_A$
[m·s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] · 10 <sup>-3</sup>	[m <sup>4</sup> ·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
1366,2	1175,9	860,7	2,17
4470,3	12589,9	2816,3	7,10
1458,3	1339,8	918,8	2,31



Obr 3.2 Bukový laminovaný panel

#### Popis:

Lepené desky jsou tvořeny vrstvou přírodního dřeva (buku). Lamely vyrobené ze dřeva jsou k sobě slepeny po celé délce a šířce.<sup>17</sup>

#### Zhodnocení:

V tabulce lze vidět, že bukový laminovaný panel má konstantu vyzařování 7,10 m<sup>4</sup>·kg<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>. Podle tabulek má bukové dřevo  $K_A$  asi 6 m<sup>4</sup>·kg<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>, lze tedy soudit, že takto upravené dřevo vyzařuje lépe než čistý buk. Tento vzorek má menší hustotu asi o 100 kg·m<sup>-3</sup> oproti hodnotě udávané v tabulkách (asi 720 kg·m<sup>-3</sup> (wikipedia, 2019)).

#### Směry využití:

Dobré rezonanční vlastnosti vzorku neumožňují nepravidelnosti v letokruzích a zřejmě také použitá lepidla spolu s lamelami na stranách vzorku. Z tohoto důvodu nelze materiál použít jako rezonanční desky. Zato velký vnitřní odpor  $Z$  by umožňoval použít panel například jako skříň reproduktoru.

Vhodné by bylo, aby byly vrstvy panelu zhotoveny z různých druhů dřev o různých rezonancích, je však potřeba aby k sobě vrstvy dobře přiléhaly, aby se netvořily ostré hrany, které by znehodnocovaly ozvučnici. To pomáhá odstranit případné vibrace, drnčení, kmitání a podobné parazitní jevy (Konstrukce ozvučnice reprosoustavy | Konstrukce - teorie | DEXON | REPRODUKTORY A OZVUČOVACÍ TECHNIKA., 2020).

<sup>17</sup> (musterkiste.de, 2019)

### 3.4.2 Betonové bednění

Tab. 3.3: Změřené hodnoty pro betonové bednění

Změřené hodnoty								
$m$ [g]	74,18	pozice	1	2	3	4	5	$\bar{t}$
$s_x$ [mm]	73,5	$t_x$ [μs]	58	55	56	56	48	54,6
$s_y$ [mm]	105,5	$t_y$ [μs]	20	20	20	20	20	20
$s_z$ [mm]	20,5	$t_z$ [μs]	16	16	16	17	16	16,2
$V$ [m <sup>3</sup> ]	0,000159	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	466,7					

Tab. 3.4: Vypočítané hodnoty pro betonové bednění

Vypočítané hodnoty			
$\nu$	$E$	$Z$	$K_A$
[m·s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] · 10 <sup>-3</sup>	[m <sup>4</sup> ·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
1346,2	845,6	628,2	2,88
5275,0	12984,9	2461,6	11,30
1265,4	747,3	590,5	2,71



#### Popis:

Betonové bednění ze smrku lakované syntetickou pryskyřicí. Jedná se o běžné smrkové dřevo, které je však nalakované pryskyřicí kvůli ochraně dřeva.<sup>18</sup>

#### Zhodnocení:

Vyzařovací konstanta betonového bednění ze smrku je ve směru vláken 11,3 m<sup>4</sup>·kg<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>. Jedná se o hodnotu, která je oproti akustickému smrku menší jen o 0,7 m<sup>4</sup>·kg<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>. Je pravděpodobné, že po naprostém vysušení dřeva by se  $K_A$  ještě zvětšila. Na obrázku můžeme vidět, že vrstvy lét nemají příliš velkou pravidelnost (jejich šířky nemají pravidelné velikosti), což je hlavní parametr rezonančních stromů. Co také zhoršuje rezonanční vlastnosti tohoto smrkového vzorku, jsou suky (uprostřed nahoře a nalevo dole). Narušují pravidelnost letokruhů a zvětšují hustotu dřeva kolem místa, ve kterém se nacházejí.

Obr. 3.3: Betonové bednění

#### Směry využití:

Smrk, jak již bylo řečeno v kapitole 2.2, je vhodný materiál na výrobu částí hudebních nástrojů (rezonančních desek klavírů, strunných nástrojů apod.), od kterých se čeká velká radiace zvuku, a naopak malý vnitřní odpor.

<sup>18</sup> (musterkiste.de, 2019)

### 3.4.3 MDF krytý hliníkovou fólií

Tab. 3.5: Změřené hodnoty pro MDF krytý hliníkovou fólií

Změřené hodnoty								
$m$ [g]	124,98	pozice	1	2	3	4	5	$\bar{t}$
$s_x$ [mm]	74	$t_x$ [μs]	35	32	35	32	32	33,2
$s_y$ [mm]	105,5	$t_y$ [μs]	42	44	45	44	46	44,2
$s_z$ [mm]	19,5	$t_z$ [μs]	24	24	23	23	23	23,4
$V$ [m <sup>3</sup> ]	0,000152	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	821,0					

Tab. 3.6: Vypočítané hodnoty pro MDF krytý hliníkovou fólií

Vypočítané hodnoty			
$v$	$E$	$Z$	$K_A$
[m·s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] · 10 <sup>-3</sup>	[m <sup>4</sup> ·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
2228,9	4078,6	1829,8	2,72
2386,9	4677,2	1959,5	2,91
833,3	570,1	684,1	1,02



Obr. 3.4: MDF krytý hliníkovou fólií

#### Popis:

Základ vzorku tvoří MDF (viz 3.4.11), ten je ještě potažený hliníkovou fólií.<sup>19</sup>

#### Zhodnocení:

U MDF nelze sice určit směr vláken (dá-li se tu vůbec o nějakých vláknech mluvit), avšak je z tabulky vidět, že v žádném z měřených směrů nedochází k příliš velkému vyzařování zvuku. Je to způsobeno velkou hustotou materiálu, a tedy velkým akustickým odporem. Velký akustický odpor mají všeobecně také kovy (v tomto případě hliníková fólie, která plní ochrannou nebo dekorační funkci). Měření ukázalo, že tento vzorek má velkou hustotu (největší z měřených materiálů) a poměrně velký akustický odpor  $Z$ . Vzorek je také velmi tvrdý.

#### Směry využití:

Z výše uvedených důvodů by mohl být vzorek vhodný pro sestavení menších ozvučnic reproduktorů (kvůli velké hustotě by větší reproduktorové soustavy dosahovaly velké hmotnosti a nebyly by příliš mobilní) a výztuh na jejich zpevnění. Samotná hliníková fólie přes svoji malou tloušťku nemá na akustické vlastnosti téměř žádný vliv, avšak reproduktorové skříně by dodala netradiční vzhled.

<sup>19</sup> (musterkiste.de, 2019)

### 3.4.4 Acetylované dřevo

Tab. 3.7: Změřené hodnoty pro acetylované dřevo

Změřené hodnoty								
$m$ [g]	67,729	pozice	1	2	3	4	5	$\bar{t}$
$s_x$ [mm]	74	$t_x$ [μs]	72	65	67	64	70	67,6
$s_y$ [mm]	105	$t_y$ [μs]	26	26	29	30	29	28
$s_z$ [mm]	17,5	$t_z$ [μs]	12	12	12	12	12	12
$V$ [m <sup>3</sup> ]	0,000136	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	498,1					

Tab. 3.8: Vypočítané hodnoty pro acetylované dřevo

Vypočítané hodnoty			
$v$	$E$	$Z$	$K_A$
[m·s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] · 10 <sup>-3</sup>	[m <sup>4</sup> ·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
1094,7	596,9	545,3	2,20
3750,0	7004,5	1867,9	7,53
1458,3	1059,3	726,4	2,93



#### Popis:

Acetylované dřevo je chemicky upravené dřevo za pomoci kyseliny octové tak, že mění jeho buněčnou strukturu (hydroxylové skupiny se mění na acetylové skupiny – vodík, uhlík, kyslík). Chemickými úpravami lze dosáhnout zlepšení vlastností dřeva jako rozměrová stálost, trvanlivost nebo odolnost proti plísním či hmyzu. Využívá se především v prostorech se zvýšenou vlhkostí vzduchu (venkovní využití).<sup>20</sup>

#### Zhodnocení:

Dřevo nejlépe vyzařuje ve směru osy  $y$  (podle Obr. 3.1), ale je natolik husté, že  $K_A$  je rovna pouze 7,53 m<sup>4</sup>·kg<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup> a akustický odpor  $Z$  asi 1,87 kg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>. Pro směr šíření zvuku kolmo na vlákna platí, že vyzařuje velmi málo. Právě chemické úpravy, které mají za účel zlepšit rozměrovou stálost vzorku, mohou vést k tomu, že dřevo nemá tak dobré rezonanční vlastnosti.

#### Směry využití:

Dřevo je poměrně tvrdé a má zajímavý vzhled (žíhání) využil bych jej proto například jako zadní desku strunných nástrojů. Z hlediska velkého akustického odporu pak jako reproduktorovou ozvučnici.

<sup>20</sup> (musterkiste.de, 2019)

### 3.4.5 MDF barvený – oranžová

Tab. 3.9: Změřené hodnoty pro MDF barvený – oranžová

Změřené hodnoty								
$m$ [g]	117,19	pozice	1	2	3	4	5	$\bar{t}$
$s_x$ [mm]	73,5	$t_x$ [μs]	34	35	35	34	34	34,4
$s_y$ [mm]	105,5	$t_y$ [μs]	46	49	48	49	49	48,2
$s_z$ [mm]	19,5	$t_z$ [μs]	28	28	26	28	28	27,6
$V$ [m <sup>3</sup> ]	0,000151	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	775,0					

Tab. 3.10: Vypočítané hodnoty pro MDF barvený – oranžová

Vypočítané hodnoty			
$\nu$	$E$	$Z$	$K_A$
[m·s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] · 10 <sup>-3</sup>	[m <sup>4</sup> ·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
2136,6	3538,1	1655,9	2,76
2188,8	3713,0	1696,4	2,82
706,5	386,9	547,6	0,91



Obr. 3.6: MDF barvený – oranžová

#### Popis:

Tento materiál bývá barven v celém jeho objemu (kvůli zachování stejné barvy při jeho opotřebení či poškození). MDF (viz 3.4.11) je spojen barvivem na vodní bázi smíchaným s pryskyřicí, lisován za vysokého tlaku a vysoké teploty.<sup>21</sup>

#### Zhodnocení

MDF se vyznačuje poměrně velkou hustotou a výsledný akustický odpor je proto pro všechny směry šíření zvuku veliký. Naopak konstanty vyzařování mají velikost pouze asi 2,8 m<sup>4</sup>·kg<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>. Lze tedy říci, že vzorek, co se rezonance týče, nemá dobré vlastnosti.

#### Směry využití:

Velká hustota MDF spolu s jeho velkou tvrdostí umožňují použití materiálu na výrobu ozvučnic reproduktorů. Výhoda MDF je také snadná povrchová úprava, proto jej lze uplatnit také jako neprůzvučný (rezonanci nepodporující) stavební prvek například v divadlech, nahrávacích studiích, koncertních sálech a podobně. Nevýhoda je velká hmotnost materiálu při velkých rozměrech.

<sup>21</sup> (musterkiste.de, 2019)



### 3.4.6 MDF barvený – modrá

Tab. 3.11: Změřené hodnoty pro MDF barvený – modrá

Změřené hodnoty								
$m$ [g]	114,22	pozice	1	2	3	4	5	$\bar{t}$
$s_x$ [mm]	73,5	$t_x$ [μs]	35	35	35	35	36	35,2
$s_y$ [mm]	105,5	$t_y$ [μs]	49	49	49	49	49	49
$s_z$ [mm]	19,5	$t_z$ [μs]	26	26	25	26	26	25,8
$V$ [m <sup>3</sup> ]	0,000151	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	755,4					

Tab. 3.12: Vypočítané hodnoty pro MDF barvený – modrá

Vypočítané hodnoty			
$\nu$	$E$	$Z$	$K_A$
[m·s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] · 10 <sup>-3</sup>	[m <sup>4</sup> ·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
2088,1	3293,5	1577,3	2,76
2153,1	3501,7	1626,4	2,85
755,8	431,5	570,9	1,00



Obr. 3.7: MDF barvený – modrá

#### Popis:

Tento materiál bývá barven v celém jeho objemu (kvůli zachování stejné barvy při jeho opotřebení či poškození). MDF (viz 3.4.11) je spojen barvivem na vodní bázi smíchaným s pryskyřicí lisován za vysokého tlaku a vysoké teploty.<sup>22</sup>

#### Zhodnocení:

Vzorek má velkou hustotou akustický odpor je proto pro všechny směry šíření zvuku rovněž vcelku veliký. Konstanty vyzařování mají velikost pouze asi 2,8 m<sup>4</sup>·kg<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>. Proto lze říci, že vzorek nemá dobré radiční vlastnosti.

#### Směry využití:

Jedná se v podstatě o materiál s velmi podobnými vlastnostmi jako má předchozí vzorek (viz 3.4.5). Velká hustota, velká tvrdost, snadná povrchová úprava. Materiál lze tedy také použít velmi podobným způsobem. Velká hustota vzorku však znamená, že velké konstrukce budou těžké a složité manipulovatelné. Rozdíl mezi těmito vzorky (tímto a oranžovým

MDF) je tedy v první řadě jejich barva (lze nabarvit tak, jak uživatel potřebuje) a také mírně odlišná hustota (menší hustota barvy).

<sup>22</sup> (musterkiste.de, 2019)

### 3.4.7 Vrstvené dřevo (LVL)

Tab. 3.13: Změřené hodnoty pro vrstvené dřevo (LVL)

Změřené hodnoty								
$m$ [g]	76,61	pozice	1	2	3	4	5	$\bar{t}$
$s_x$ [mm]	74,5	$t_x$ [μs]	17	18	18	17	18	17,6
$s_y$ [mm]	106	$t_y$ [μs]	24	24	23	23	23	23,4
$s_z$ [mm]	20	$t_z$ [μs]	19	19	19	19	19	19
$V$ [m <sup>3</sup> ]	0,000158	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	485,1					

Tab. 3.14: Vypočítané hodnoty pro vrstvené dřevo (LVL)

Vypočítané hodnoty			
$v$	$E$	$Z$	$K_A$
[m·s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] · 10 <sup>-3</sup>	[m <sup>4</sup> ·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
4233,0	8691,2	2053,2	8,73
4529,9	9953,4	2197,3	9,34
1052,6	537,5	510,6	2,17



Obr. 3.8: Vrstvené dřevo LVL

#### Popis:

Jedná se o vrstvené dřevo, tedy několik dřevěných dýh, které jsou vzájemně slepeny, což způsobuje, že přirozené vady a nepravidelnosti jednotlivých dýh jsou rozděleny mezi ostatní dýhy (vysoká stabilita dřeva). Vláknina jsou orientována ve stejném směru. Obvykle se používá jako nosníky, sloupy atd.<sup>23</sup>

#### Zhodnocení:

Z toho důvodu, že jsou vlákna orientovaná souhlasně, a ani ve směru osy  $x$  a osy  $y$  se nejedná o směr kolmý na vlákna, je rychlost zvuku poměrně vysoká pro oba směry. Vzorek má sice velký akustický odpor, ale zároveň je schopen i nadprůměrného vyzařování.

#### Směry využití:

Materiál by se mohl využít při zhotovování cenově náročných hudebních nástrojů. Kvalita zvuku by však zřejmě nebyla nijak zvlášť dobrá. Dalším využitím by mohly být části hudebních nástrojů, jejichž primárním účelem není rezonance.

Například výztuhy a spoje uvnitř kytar (žebrování), které mají podporovat mechanickou pevnost rezonanční desky.

<sup>23</sup> (musterkiste.de, 2019)



### 3.4.8 Překližka

Tab. 3.15: Změřené hodnoty pro překližku

Změřené hodnoty								
$m$ [g]	39,74	pozice	1	2	3	4	5	$\bar{t}$
$s_x$ [mm]	73,5	$t_x$ [μs]	23	20	22	20	23	21,6
$s_y$ [mm]	104,5	$t_y$ [μs]	30	29	29	30	29	29,4
$s_z$ [mm]	11,5	$t_z$ [μs]	12	12	12	12	12	12
$V$ [m <sup>3</sup> ]	8,83E-05	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	449,9					

Tab. 3.16: Vypočítané hodnoty pro překližku

Vypočítané hodnoty			
$v$	$E$	$Z$	$K_A$
[m·s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] · 10 <sup>-3</sup>	[m <sup>4</sup> ·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
3402,8	5209,5	1530,9	7,56
3554,4	5684,1	1599,2	7,90
958,3	413,2	431,2	2,13



Obr. 3.9: Překližka

#### Popis:

Překližky jsou vyrobeny z nejméně tří vrstev lepené dýhy a platí, že vrstvy jsou na sebe kolmé. Překližky se vyrábějí z nejrůznějších druhů dřeva (bříza, buk, topol, ...). Nejčastěji se používá na výrobu nábytku nebo jako interiérové vybavení.<sup>24</sup>

#### Zhodnocení:

V Tab. 3.16: Vypočítané hodnoty pro překližku je vidět, že rychlost zvuku je téměř stejná nezávisle na směru šíření ve vzorku.  $K_A$  je tedy také téměř shodná pro oba směry ( $x$ ,  $y$ ) a má velikost 7,6 a 7,9 m<sup>4</sup>·kg<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>.

#### Směry využití:

Tento materiál by opět mohl být použit k výrobě levných ozvučných desek od kterých by nebyla vyžadována velmi dobrá kvalita zvuku. Kdyby se podařilo docílit toho, že mezi jednotlivými vrstvami překližky nebudou vzduchové mezery, které by jinak mohly způsobovat nežádané jevy jako vibrování,

vydávání nepříjemného zvuku, rezonování a podobně a docílilo by se tak snížení akustické konstanty a zvětšení akustického odporu, mohl by být materiál použit na výrobu ozvučných desek (ozvučnic) reproduktorů.

<sup>24</sup> (musterkiste.de, 2019)

### 3.4.9 Březová překližka s fenolickou fólií

Tab. 3.17: Změřené hodnoty pro březovou překližku s fenolickou fólií

Změřené hodnoty								
$m$ [g]	49,54	pozice	1	2	3	4	5	$\bar{t}$
$s_x$ [mm]	74,5	$t_x$ [μs]	19	18	18	18	18	18,2
$s_y$ [mm]	104,5	$t_y$ [μs]	26	26	25	26	26	25,8
$s_z$ [mm]	9,5	$t_z$ [μs]	12	12	12	12	12	12
$V$ [m <sup>3</sup> ]	0,000074	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	669,8					

Tab. 3.18: Vypočítané hodnoty pro březovou překližku s fenolickou fólií

Vypočítané hodnoty			
$\nu$	$E$	$Z$	$K_A$
[m·s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] · 10 <sup>-3</sup>	[m <sup>4</sup> ·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
4093,4	11223,5	2741,9	6,11
4050,4	10988,9	2713,0	6,05
791,7	419,8	530,3	1,18



Obr. 3.10: Březová překližka s fenolickou fólií

#### Popis:

Jedná se o normální překližku (viz 3.4.8), která je však potažena fenolickou fólií, která plní ochrannou funkci a její hrany jsou nalakovány akrylovým lakem, aby se zabránilo příjmu vlhkosti.<sup>25</sup>

#### Zhodnocení:

Březová překližka má velké hodnoty modulu pružnosti, a proto se v ní šíří zvuk rychle. Kvůli vysoké hustotě však klade zvukovým vlnám velký akustický odpor a akustická konstanta má hodnotu pouze 6,1 m<sup>4</sup>·kg<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>.

#### Směry využití:

Bříza se, alespoň v tomto měření, neprokázala být z rezonančního hlediska dobrým materiálem, překližky by však své využití najít mohly (například spodní desky strunných nástrojů, u kterých je vyžadována velká tvrdost materiálu), pokud by uživatel nástroje, vyrobeného z tohoto materiálu, nehleděl v první řadě na kvalitu nástroje ale na jeho nízkou cenu. Na druhé straně je velký akustický vlnový odpor a poměrně velká

hustota vzorku. Tyto vlastnosti se hodí pro výrobu reproduktorových ozvučnic a jejich výztuh. Navíc překližka nemá tak velkou hustotu jako MDF materiály, které se dají použít k podobným účelům, proto z ní lze zhotovovat také větší reproduktorové soustavy (skříně), které díky nižší hmotnosti budou mobilnější, než kdyby byly zhotoveny právě z MDF.

<sup>25</sup> (musterkiste.de, 2019)

### 3.4.10 Bambusový panel

Tab. 3.19: Změřené hodnoty pro bambusový panel

Změřené hodnoty								
$m$ [g]	94,49	pozice	1	2	3	4	5	$\bar{t}$
$s_x$ [mm]	74	$t_x$ [μs]	22	22	22	20	22	21,6
$s_y$ [mm]	106,5	$t_y$ [μs]	32	36	35	34	35	34,4
$s_z$ [mm]	20,5	$t_z$ [μs]	13	13	13	13	13	13
$V$ [m <sup>3</sup> ]	0,000162	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	584,9					

Tab. 3.20: Vypočítané hodnoty pro bambusový panel

Vypočítané hodnoty			
$v$	$E$	$Z$	$K_A$
[m·s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] · 10 <sup>-3</sup>	[m <sup>4</sup> ·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
3425,9	6864,5	2003,7	5,86
3095,9	5605,7	1810,7	5,29
1576,9	1454,4	922,3	2,70



Obr. 3.11: Bambusový panel

#### Popis:

3 – vrstvý panel vyrobený z parou ošetřené bambusové tyče. Povrch je oboustranně broušený.<sup>26</sup>

#### Zhodnocení:

Vrstvy jsou naskládány tak, že jsou na sebe vlákna kolmá. Jak lze na obrázku 2.11 vidět, krajní dvě vrstvy podporují podélné šíření zvuku a prostřední vrstva zvuk jdoucí šířkou vzorku. Zároveň se však krajní vrstvy s prostřední vrstvou ruší, takže akustické konstanty mají velikost 5,29 a 5,86 m<sup>4</sup>·kg<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>.

#### Směry využití:

Jak je vidět v tabulkách (hlavně Tab. 3.43, která jednotlivé vzorky porovnává), tento vzorek patří ve všech směrech měření do průměru. Nedisponuje dobrým vyzařováním a na druhé straně ani kvalitním tlumením způsobeným velkým vnitřním akustickým odporem. Pokud bych měl vzorek využít v hudebním průmyslu, volil bych ho jako materiál na reproduktorové ozvučnice nebo jako akusticky-dekorační prvek v divadlech či koncertních síních.

<sup>26</sup> (musterkiste.de, 2019)

### 3.4.11 MDF (Medium density fibreboard)

Tab. 3.21: Změřené hodnoty pro MDF (medium density fibreboard)

Změřené hodnoty								
$m$ [g]	89,53	pozice	1	2	3	4	5	$\bar{t}$
$s_x$ [mm]	74,5	$t_x$ [μs]	35	34	35	36	35	35
$s_y$ [mm]	106	$t_y$ [μs]	46	46	47	46	46	46,2
$s_z$ [mm]	16	$t_z$ [μs]	22	22	22	22	22	22
$V$ [m <sup>3</sup> ]	0,000126	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	708,6					

Tab. 3.22: Vypočítané hodnoty pro MDF (medium density fibreboard)

Vypočítané hodnoty			
$v$	$E$	$Z$	$K_A$
[m·s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] · 10 <sup>-3</sup>	[m <sup>4</sup> ·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
2128,6	3210,4	1508,3	3,00
2294,4	3730,0	1625,7	3,24
727,3	374,8	515,3	1,03



Obr. 3.12: MDF (medium density fibreboard)

#### Popis:

Jedná se o sololit (dřevovláknitá deska), která se vyrábí z dřevěné kulatiny<sup>27</sup>, která je za pomoci lepidla, velkého tlaku a tepla slisována.<sup>28</sup>

#### Zhodnocení:

Díky poměrně velké hustotě materiálu je rychlost šíření zvuku relativně malá, proto je malá i  $K_A$  v obou směrech (nelze určit orientaci vláken) a naopak velký akustický odpor. Dále je v Tab. 3.21 vidět, že má MDF velkou hustotu (danou právě lisováním velkým tlakem).

#### Směry využití:

Tyto parametry jsou žádoucí u ozvučnic reproduktorů, u neprůzvučných obkladů stěn koncertních sálů, divadel, nahrávacích studií a kdekoliv, kde nechceme, aby k nám pronikal zvuk zvenčí. Velká hustota materiálu však znamená velkou hmotnost při velkých rozměrech a s ní spojenou špatnou mobilitu.

<sup>27</sup> Kulatina – úřezek z kmene (větve) stromu, který tvoří kruh

<sup>28</sup> (musterkiste.de, 2019)

### 3.4.12 Dřevotříska

Tab. 3.23: Změřené hodnoty pro dřevotřísku

Změřené hodnoty								
$m$ [g]	102,83	pozice	1	2	3	4	5	$\bar{t}$
$s_x$ [mm]	74,5	$t_x$ [μs]	29	29	28	29	29	28,8
$s_y$ [mm]	105	$t_y$ [μs]	44	43	44	42	41	42,8
$s_z$ [mm]	18,5	$t_z$ [μs]	26	26	26	23	26	25,4
$V$ [m <sup>3</sup> ]	0,000145	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	710,6					

Tab. 3.24: Vypočítané hodnoty pro dřevotřísku

Vypočítané hodnoty			
$v$	$E$	$Z$	$K_A$
[m·s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] · 10 <sup>-3</sup>	[m <sup>4</sup> ·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
2586,8	4754,8	1838,1	3,64
2453,3	4276,6	1743,2	3,45
728,3	376,9	517,5	1,03



Obr. 3.13: Dřevotříska

#### Popis:

Tato dřevotříska používá polyuretanové pojivo, které je vyráběno bez dalších chemických přísad, proto je obsah formaldehydu ekvivalentní neošetřenému dřevu (uhlík, vodík, kyslík).<sup>29</sup>

#### Zhodnocení:

Díky poměrně malému modulu pružnosti neprochází vzorkem zvuk takovou rychlostí, aby přes vysokou hustotu dřevotřísky, a tedy vysoký akustický odpor, nedocházelo k příliš velkému vyzařování a akustické konstanty se pohybují od 3,5 do 3,6 m<sup>4</sup>·kg<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>.

#### Směry využití:

Na obrázku jde vidět, že dřevotříska moc neodpovídá popisu akustického dřeva. Hlavními požadavky akustického dřeva jsou pravidelnost a dostatečná hustota letokruhů. V tomto případě vidíme, že je struktura dřevotřísky velice neuspořádaná a o letokruzích tu ani nelze mluvit. Proto je potřeba

se zaměřit na opak rezonance, a to na tlumení zvukových vln. V tabulkách pro tento materiál jde vidět, že má dřevotříska poměrně velkou hustotu a také akustický vlnový odpor  $Z$ . Lze ji tedy použít při výrobě reproduktorových skříní. Oproti MDF vzorkům má hustotu menší, je tedy lehčí, a proto použitelná i na větší konstrukce reproduktorových ozvučnic. Dále může být využita jako podlaha nebo stěna (výplň) v případech, kdy chceme zamezit pronikání zvuků z okolních místností.

<sup>29</sup> (musterkiste.de, 2019)



### 3.4.13 Buková překližka

Tab. 3.25: Změřené hodnoty pro bukovou překližku

Změřené hodnoty								
$m$ [g]	90,96	pozice	1	2	3	4	5	$\bar{t}$
$s_x$ [mm]	74,5	$t_x$ [μs]	25	23	24	24	24	24
$s_y$ [mm]	104,5	$t_y$ [μs]	29	29	28	28	29	28,6
$s_z$ [mm]	14,5	$t_z$ [μs]	12	12	12	12	12	12
$V$ [m <sup>3</sup> ]	0,000113	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	805,8					

Tab. 3.26: Vypočítané hodnoty pro bukovou překližku

Vypočítané hodnoty			
$\nu$	$E$	$Z$	$K_A$
[m·s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] · 10 <sup>-3</sup>	[m <sup>4</sup> ·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
3104,2	7764,3	2501,2	3,85
3653,8	10757,5	2944,2	4,53
1208,3	1176,5	973,6	1,50



Obr. 3.14: Buková překližka

#### Popis:

Nehořlavá, nepodporující dýmení. Vyrábí se jako běžná překližka (viz 3.4.8) ale z bukového dřeva a nehořlavých chemických přísad.<sup>30</sup>

#### Zhodnocení:

Buková překližka má velké hodnoty modulu pružnosti a díky tomu se v ní zvuk šíří relativně rychle, nicméně kvůli velkému akustickému odporu způsobenému velkou hustotou vzorku dochází k velkému tlumení vnitřním třením, a proto  $K_A$  pro osu  $x$  je rovna asi 3,9 m<sup>4</sup>·kg<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup> a pro osu  $y$  asi 4,5 m<sup>4</sup>·kg<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup> (osy podle Obr. 3.1). Hlavním aspektem špatných rezonančních vlastností by mohl být materiál, ze kterého je překližka vyrobena – buk. Dalšími faktory jsou pravděpodobně použitá lepidla (množství použitých lepidel) nebo také vrstvení destiček překližky (směr vláken).

#### Směry využití:

Výše zmíněné má za následek velký akustický vlnový odpor materiálu (největší hodnota ze všech měřených vzorků). Využití by tato překližka mohla však najít naopak v místech, kde je potřeba, aby zvukové vlny dále neprocházely (například výroba reproduktorových skříní, neprůzvučné obklady stěn a podobně). Materiál navíc nepodporuje hoření, proto by mohl být použit také jako bezpečná, zvukotěsná výplň mezi stěnami a stropy (podlahami) sousedících místností.

<sup>30</sup> (musterkiste.de, 2019)

### 3.4.14 Smrkový třívrstvý panel

Tab. 3.27: Změřené hodnoty pro smrkový třívrstvý panel

Změřené hodnoty								
$m$ [g]	96,13	pozice	1	2	3	4	5	$\bar{t}$
$s_x$ [mm]	74	$t_x$ [μs]	24	22	18	20	25	21,8
$s_y$ [mm]	105	$t_y$ [μs]	22	20	20	22	22	21,2
$s_z$ [mm]	27	$t_z$ [μs]	20	23	22	24	18	21,4
$V$ [m <sup>3</sup> ]	0,00021	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	458,2					

Tab. 3.28: Vypočítané hodnoty pro smrkový třívrstvý panel

Vypočítané hodnoty			
$\nu$	$E$	$Z$	$K_A$
[m·s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] · 10 <sup>-3</sup>	[m <sup>4</sup> ·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
3394,5	5279,9	1555,4	7,41
4952,8	11240,4	2269,5	10,81
1261,7	729,4	578,1	2,75



Obr. 3.15: Smrkový třívrstvý panel

#### Popis:

Třívrstvé panely jsou vyrobeny ze tří vrstev jehličnatého (nebo listnatého) dřeva slepených dohromady tak, aby na sebe vlákna každé vrstvy byla kolmá.<sup>31</sup>

#### Zhodnocení:

Jedná se o třívrstvý panel, který je vyroben ze smrku, proto má vzorek relativně malou hustotu. Navíc kvůli velkým modulům pružnosti (hlavně  $E_y$ ) mají zvukové vlny velkou rychlost, což, jak je vidět v Tab. 3.28, velmi podporuje vyzařování ( $K_{Ax} = 7,4 \text{ m}^4 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  a  $K_{Ay} = 10,8 \text{ m}^4 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Na tomto vzorku se opět ukazuje dobrá kvalita smrku jakožto rezonančního materiálu. To, co v tomto případě může zhoršovat vyzařování zvuku, je nepravidelné uspořádání lét jednotlivých vrstev v panelu. Na fotce můžeme také vidět suky na levé straně vzorku, které rovněž kazí jeho akustické vlastnosti.

#### Směry využití:

Tento materiál by mohl být použit jako rezonanční deska spíše levnějších nástrojů nebo, protože se jedná o materiál pevný, jako žebrování a výztuhy kytar.

<sup>31</sup> (musterkiste.de, 2019)

### 3.4.15 Paropropustný MDF

Tab. 3.29: Změřené hodnoty pro paropropustný MDF

Změřené hodnoty								
$m$ [g]	69,12	pozice	1	2	3	4	5	$\bar{t}$
$s_x$ [mm]	74	$t_x$ [μs]	37	37	37	37	37	37
$s_y$ [mm]	104,5	$t_y$ [μs]	50	50	50	49	48	49,4
$s_z$ [mm]	15	$t_z$ [μs]	28	29	29	28	28	28,4
$V$ [m <sup>3</sup> ]	0,000116	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	595,9					

Tab. 3.30: Vypočítané hodnoty pro paropropustný MDF

Vypočítané hodnoty			
$\nu$	$E$	$Z$	$K_A$
[m·s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] · 10 <sup>-3</sup>	[m <sup>4</sup> ·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
2000,0	2383,6	1191,8	3,36
2115,4	2666,5	1260,5	3,55
528,2	166,2	314,7	0,89



Obr. 3.16: Paropropustný MDF

#### Popis:

Vzorek je vyroben z přírodních pryskyřičných dřevěných vláken z jehličnanů a zpracováván jako běžný MDF (viz 3.4.11). Navíc je nasycený síranem hlinitým (kamencem), díky kterému je materiál vodoodpudivý.<sup>32</sup>

#### Zhodnocení:

Tento MDF je vodoodpudivý, a tak má nižší hustotu oproti jiným MDF vzorkům. Avšak nízké hodnoty Youngova modulu pružnosti zapříčiňují, že se vzorkem šíří zvuk pomalu a  $K_A$  mají velikost pouze 3,4 a 3,6 m<sup>4</sup>·kg<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>. Za zmínění stojí malá rychlost zvuku (v porovnání s ostatními měřenými materiály), který se materiálem šíří.

#### Směry využití:

Tento druh MDF by mohl být využit jako tlumící deska na stěnách místností nebo jako ozvučnice reproduktorů. Tento vzorek patří k lehčím z měřených MDF, lze tedy přemýšlet i o větších konstrukcích (například větších reproduktorových skříních), než tomu bylo u předchozích dřevovláknitých desek.

<sup>32</sup> (musterkiste.de, 2019)



### 3.5 Vzorky se sníženou vlhkostí vzduchu

Dřevěné vzorky z kapitoly 2.4, byly skladovány a měřeny v pokojových podmínkách (20 °C při vlhkosti vzduchu asi 60 %), což má vliv na jejich vnitřní strukturu. Vzorky pohlcují vlhkost, která zaplňuje praskliny a kapilárky. Vzorky pak kladou větší odpor k šíření zvuku. Jeho rychlost je pak menší a vzorky mají odlišné rezonanční vlastnosti oproti vysušeným vzorkům. Proto jsem vybrané vzorky umístil do klimatizace a snížil vlhkost vzduchu na asi 12 %. Následně jsem je stejným způsobem (jako v kapitole 3.4) přeměřil.

#### 3.5.1 Bukový laminovaný panel s postranním lepením

Tab. 3.31: Změřené hodnoty pro laminovaný bukový panel (snížená vlhkost)

Změřené hodnoty								
$m$ [g]	84,945	pozice	1	2	3	4	5	$\bar{t}$
$s_x$ [mm]	73,5	$t_x$ [μs]	58	53	50	52	53	53,2
$s_y$ [mm]	105,5	$t_y$ [μs]	23	23	23	24	24	23,4
$s_z$ [mm]	17,5	$t_z$ [μs]	12	12	12	12	12	12
$V$ [m <sup>3</sup> ]	0,000136	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	636,3					

Tab. 3.32: Vypočítané hodnoty pro laminovaný bukový panel (snížená vlhkost)

Vypočítané hodnoty			
$\nu$	$E$	$Z$	$K_A$
[m·s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] · 10 <sup>-3</sup>	[m <sup>4</sup> ·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
1381,6	1194,8	864,8	2,21
4508,5	12724,3	2822,3	7,20
1458,3	1331,3	912,9	2,33

#### 3.5.2 MDF krytý hliníkovou fólií

Tab. 3.33: Změřené hodnoty pro MDF krytý hliníkovou fólií (snížená vlhkost)

Změřené hodnoty								
$m$ [g]	124,82	pozice	1	2	3	4	5	$\bar{t}$
$s_x$ [mm]	74	$t_x$ [μs]	32	33	31	33	32	32,2
$s_y$ [mm]	105,5	$t_y$ [μs]	43	44	44	43	43	43,4
$s_z$ [mm]	19,5	$t_z$ [μs]	23	24	24	23	23	23,4
$V$ [m <sup>3</sup> ]	0,000152	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	819,9					

Tab. 3.34: Vypočítané hodnoty pro MDF krytý hliníkovou fólií (snížená vlhkost)

Vypočítané hodnoty			
$\nu$	$E$	$Z$	$K_A$
[m·s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] · 10 <sup>-3</sup>	[m <sup>4</sup> ·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
2298,1	4330,3	1884,3	2,80
2430,9	4845,0	1993,1	2,96
833,3	569,4	683,3	1,02

### 3.5.3 MDF barvený – modrá

Tab. 3.35: Změřené hodnoty pro MDF barvený – modrá (snížená vlhkost)

Změřené hodnoty								
$m$ [g]	114,05	pozice	1	2	3	4	5	$\bar{t}$
$s_x$ [mm]	73,5	$t_x$ [μs]	35	35	35	35	35	35
$s_y$ [mm]	105,5	$t_y$ [μs]	49	49	49	49	49	49
$s_z$ [mm]	19,5	$t_z$ [μs]	26	26	26	26	26	26
$V$ [m <sup>3</sup> ]	0,000151	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	754,3					

Tab. 3.36: Vypočítané hodnoty pro MDF barvený – modrá (snížená vlhkost)

Vypočítané hodnoty			
$\nu$	$E$	$Z$	$K_A$
[m·s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] · 10 <sup>-3</sup>	[m <sup>4</sup> ·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
2100,0	3326,3	1583,9	2,78
2153,1	3496,5	1624,0	2,85
750,0	424,3	565,7	0,99

### 3.5.4 Vrstvené dřevo (LVL)

Tab. 3.37: Změřené hodnoty pro vrstvené dřevo (LVL) (snížená vlhkost)

Změřené hodnoty								
$m$ [g]	76,54	pozice	1	2	3	4	5	$\bar{t}$
$s_x$ [mm]	74,5	$t_x$ [μs]	17	17	17	17	18	17,2
$s_y$ [mm]	106	$t_y$ [μs]	24	23	23	24	23	23,4
$s_z$ [mm]	20	$t_z$ [μs]	20	19	20	19	20	19,6
$V$ [m <sup>3</sup> ]	0,000158	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	484,6					

Tab. 3.38: Vypočítané hodnoty pro vrstvené dřevo (LVL) (snížená vlhkost)

Vypočítané hodnoty			
$\nu$	$E$	$Z$	$K_A$
[m·s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] · 10 <sup>-3</sup>	[m <sup>4</sup> ·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
4331,4	9091,8	2099,1	8,94
4529,9	9944,3	2195,3	9,35
1020,4	504,6	494,5	2,11

### 3.5.5 Březová překližka s fenolickou folií

Tab. 3.39: Změřené hodnoty pro březovou překližku s fenolickou folií (snížená vlhkost)

Změřené hodnoty								
$m$ [g]	49,4	pozice	1	2	3	4	5	$\bar{t}$
$s_x$ [mm]	74,5	$t_x$ [μs]	19	18	19	18	18	18,4
$s_y$ [mm]	104,5	$t_y$ [μs]	26	25	25	26	26	25,6
$s_z$ [mm]	9,5	$t_z$ [μs]	12	12	12	12	12	12
$V$ [m <sup>3</sup> ]	0,000074	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	667,9					

Tab. 3.40: Vypočítané hodnoty březovou překližku s fenolickou folií (snížená vlhkost)

Vypočítané hodnoty			
$\nu$	$E$	$Z$	$K_A$
[m·s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] · 10 <sup>-3</sup>	[m <sup>4</sup> ·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
4048,9	10949,8	2704,4	6,06
4082,0	11129,7	2726,5	6,11
791,7	418,6	528,8	1,19

### 3.5.6 Smrkový třívrstvý panel

Tab. 3.41: Změřené hodnoty pro smrkový třívrstvý panel (snížená vlhkost)

Změřené hodnoty								
$m$ [g]	96,01	pozice	1	2	3	4	5	$\bar{t}$
$s_x$ [mm]	74	$t_x$ [μs]	20	20	20	20	20	20
$s_y$ [mm]	105	$t_y$ [μs]	20	23	21	20	20	20,8
$s_z$ [mm]	27	$t_z$ [μs]	12	12	12	12	12	12
$V$ [m <sup>3</sup> ]	0,00021	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	457,6					

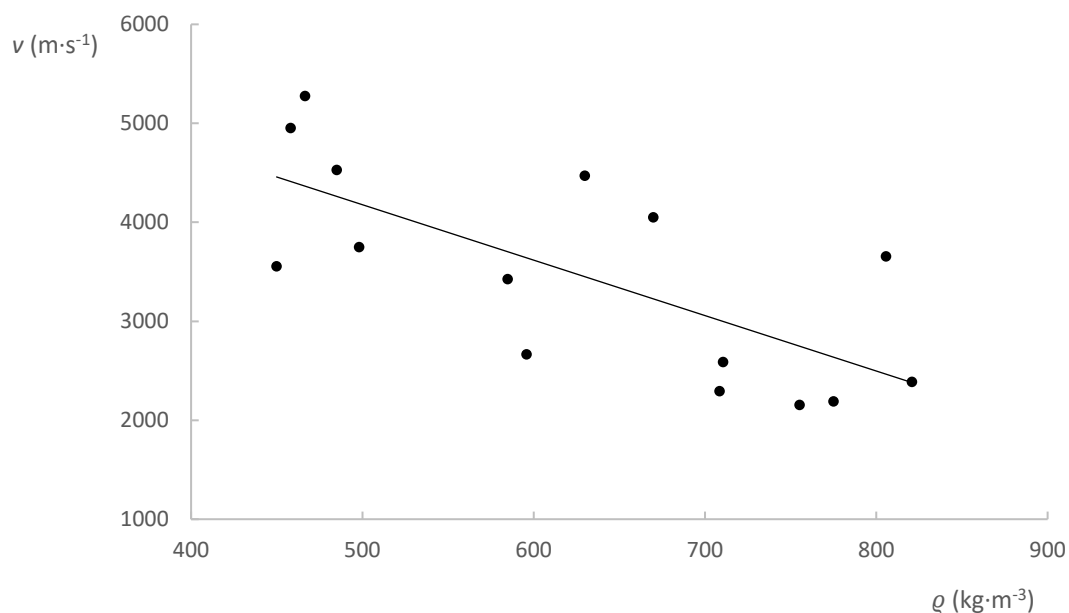
Tab. 3.42: Vypočítané hodnoty pro smrkový třívrstvý panel (snížená vlhkost)

Vypočítané hodnoty			
$\nu$	$E$	$Z$	$K_A$
[m·s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] · 10 <sup>-3</sup>	[m <sup>4</sup> ·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
3700,0	6265,2	1693,3	8,08
5048,1	11662,3	3008,1	11,03
2250,0	2316,8	1340,7	4,92

## 3.6 Porovnání

Celkově jsem změřil patnáct dřevěných vzorků a v této kapitole porovnávám jejich vlastnosti a zhodnocuji, jakým způsobem by se daly využít.

Nejdříve porovnávám vnitřní strukturu všech vzorků závislosti jejich hustoty na rychlosti zvuku, který se vzorkem šíří (viz Obr. 3.17).



Obr. 3.17: Graf závislosti hustoty vzorků na rychlosti zvuku šířícího se vzorky

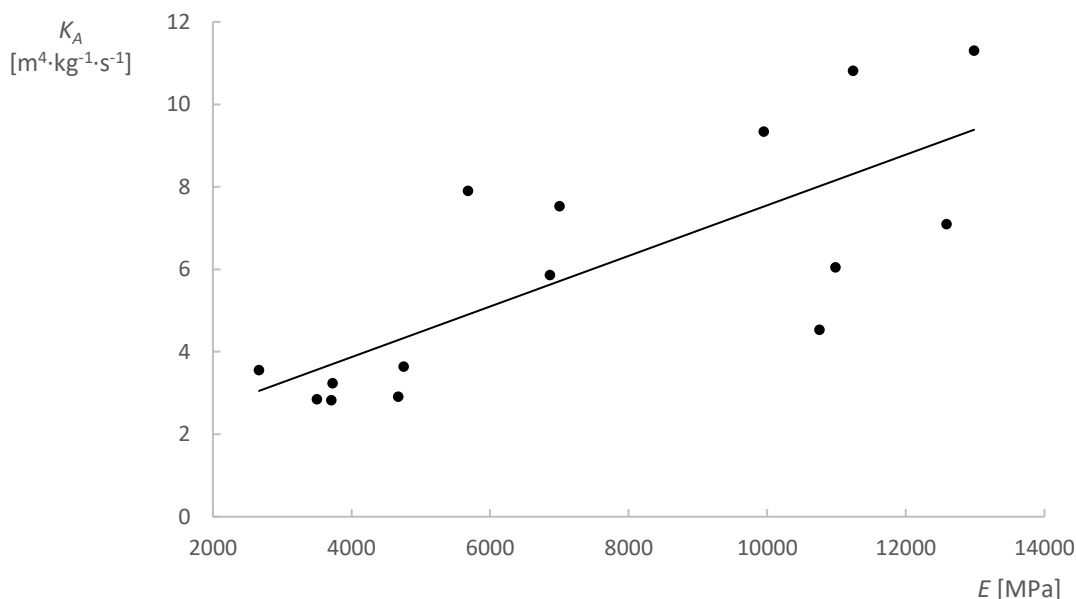
V grafu můžeme vidět, že rychlost zvuku uvnitř měřeného dřevěného materiálu klesá s jeho rostoucí hustotou. Pro vzorky s menší hustotou spíše platí, že se jimi šíří zvuk rychleji. Je to dáno tím, že vzorky s větší hustotou jsou méně pružné, proto okolí nepředávají energii zvukových vln v takové míře jako ty s menší hustotou. Důkazem může být rovnice (2.5). Když ji upravíme na  $v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ , hustota je jmenovatelem, pokud tedy roste, rychlost klesá.

Podstatou bakalářské práce jsou akustické vlastnosti měřených dřevěných materiálů, jejichž porovnání je obsahem Tab. 3.43.

Tab. 3.43: Porovnání změřených hodnot všech vzorků (pokojové podmínky)

Vzorek	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	$v$ [m·s <sup>-1</sup> ]	$E$ [MPa]	$Z$ [kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] · 10 <sup>-3</sup>	$K_A$ [m <sup>4</sup> ·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
Betonové bednění	466,7	5275,0	12984,9	2461,6	11,30
Smrkový třívrstvý panel	458,2	4952,8	11240,38	2269,5	10,81
Vrstvené dřevo (LVL)	485,1	4529,9	9953,4	2197,3	9,34
Březová překližka s fenolickou folií	449,9	3554,4	5684,134	1599,2	7,90
Acetylované dřevo	498,1	3750,0	7004,5	1867,9	7,53
Bukový laminovaný panel s postranním lepením	630,0	4470,3	12589,9	2816,3	7,10
Překližka	669,8	4050,4	10988,87	2713,0	6,05
Bambusový panel	584,9	3425,9	6864,5	2003,7	5,86
Buková překližka	805,8	3653,8	10757,48	2944,2	4,53
Dřevotřísky	710,6	2586,8	4754,8	1838,1	3,64
Paropropustná MDF	595,9	2115,4	2666,51	1260,5	3,55
MDF (Medium density fibreboard)	708,6	2294,4	3730,046	1625,7	3,24
MDF krytý hliníkovou fólií	821,0	2386,9	4677,2	1959,5	2,91
MDF barvený – modrá	755,4	2153,1	3501,7	1626,4	2,85
MDF barvený – oranžová	775,0	2188,8	3713	1696,4	2,82

Vzorky jsou seřazeny podle akustické konstanty  $K_A$  od největší hodnoty (nejvíce se přibližující akustickému smrku s hodnotou  $K_A$   $12 \text{ m}^4 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Největší hodnotu  $K_A$  mají betonové bednění, které je vyrobeno ze smrkového dřeva, a smrkový třívrstvý panel. Nejlépe vyzařujícími materiály jsou ty s nejmenší hustotou, proto není překvapující, že akustický smrk má hustotu pouze  $420 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  (Požgaj, 1997, str. 275). Platí také to, že měřené materiály s velkými hodnotami Youngova modulu pružnosti mívají větší konstantu vyzařování, než materiály s malými hodnotami  $E$  (Obr. 3.18). Jako příklad bych uvedl dřevovláknité desky MDF, které měly nejmenší akustické konstanty a nejmenší hodnoty modulu pružnosti.



Obr. 3.18: Graf závislosti Youngova modulu pružnosti na akustické konstantě měřených vzorků

MDF se všeobecně vyznačuje poměrně velkou hustotou, protože při výrobě, kdy je materiál vystaven vysokému tlaku a napouštění barvivem, dochází k zániku kapilár či prasklin (štěrbinky v materiálu). Velká hustota pak způsobuje, jak již bylo mnohokrát zmíněno v předchozích kapitolách, že se snižuje rychlost zvuku, která především ovlivňuje Youngův modul pružnosti (závislý na čtverci rychlosti). Musím konstatovat, že MDF se neosvědčily z hlediska radiace zvuku. Špatné vlastnosti má také dřevotříska. Naopak jsou tyto vzorky vhodné pro použití v případech, kde chceme, aby se zvukové vlnění tlumilo (reproduktorové skříně, obklady stěn koncertních sál a podobně).

K průměrným vzorkům z hlediska konstanty vyzařování patřily překližky a vrstvené dřevo, acetylované dřevo a bukový laminovaný panel. Na těla hudebních nástrojů a na rezonanční desky je potřeba kvalitně vyzařujícího dřeva, kam zmíněné vzorky nespádají, nicméně by se mohly z hudebního hlediska uplatnit jako prvky, jejichž primární účel není mít dobrou rezonanci, ale například pevnost, tvrdost (spojování rezonančních desek, ozvučnice reproduktorů, ...) nebo vzhled (obklady v divadlech, kinech, koncertních sálech, ...). U překližek a podobně vrstvených materiálů ze dřeva záleží, jaký druh dřevin se na výrobu použije. Je-li použit materiál s velkou akustickou konstantou (například smrk), je možno použít materiál také na stavbu hudebních nástrojů, které však nebudou dosahovat hudebních kvalit běžně používaných rezonančních dřevin.

Nejlepší parametry mají, podle očekávání, vzorky vyrobené ze smrkového dřeva. Největší akustickou konstantu má bednění ze smrku s hodnotou  $11,3 \text{ m}^4 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , které se akustickému smrku blíží nejvíce, proto je možné jej využít při výrobě hudebních nástrojů (jejich těla, rezonanční desky pianin, ...). Zlepšení akustických vlastností bednění by mohlo přinést například jeho důkladné vysušení. Kvalitní rezonanční dřevo bývá vysušeno i několik měsíců nebo, častěji, let (Požgaj, 1997, str. 276). Celkové porovnání vzorků vzhledem ke způsobům (směrům) jejich využití obsahuje Tab. 3.44.

Tab. 3.44: Porovnání možných využití měřených vzorků

Vzorek	Možné využití vzorku
Bukový laminovaný panel s postranním lepením	větší ozvučnice reproduktorů
Betonové bednění	částí hudebních nástrojů (rezonanční desky)
MDF krytý hliníkovou fólií	menší ozvučnice reproduktorů
Acetylované dřevo	zadní deska strunných nástrojů, ozvučnice reproduktorů
MDF barvený – oranžová	menší ozvučnice reproduktorů, akustické (tlumící) panely (obklady stěn)
MDF barvený – modrá	menší ozvučnice reproduktorů, akustické (tlumící) panely (obklady stěn)
Vrstvené dřevo (LVL)	částí levných hudebních nástrojů (rezonanční desky, výztuhy, žebrování, ...)
Překližka	částí levných hudebních nástrojů (rezonanční desky, výztuhy, žebrování, ...), větší ozvučnice reproduktorů
Březová překližka s fenolic-kou fólií	větší ozvučnice reproduktorů
Bambusový panel	větší ozvučnice reproduktorů, akusticky-dekorační panely (obklady stěn)
MDF (Medium density fibre-board)	menší ozvučnice reproduktorů, akustické (tlumící) panely (obklady stěn)
Dřevotříška	větší ozvučnice reproduktorů, zvukotěsné panely (obklady/výplně stěn)
Buková překližka	menší ozvučnice reproduktorů, zvukotěsné, nehořlavé panely (obklady/výplně stěn)
Smrkový třívrstvý panel	částí levných hudebních nástrojů (rezonanční desky, výztuhy, žebrování, ...)
Paropropustná MDF	větší ozvučnice reproduktorů, akustické (tlumící) panely

Vyzkoušel jsem, zda a jak se změní vlastnosti vzorků poté, co je umístím do místnosti se sníženou hodnotou vlhkosti vzduchu (oproti pokojovým podmínkám) (viz kapitola 3.5). Z celkových patnácti jsem namátkou vybral šest vzorků, které jsem opět přeměřil. Při srovnání obou měření lze vidět, že dřevo, které bylo téměř dva týdny uchovááno v klimatizované místnosti, má nepatrně menší hmotnost (desetiny, maximálně jednotky gramů), protože obsahuje menší množství vlhkosti. Rozměry vzorků se nezměnily. Menší hmotnost, a tedy menší hustota umožňují zvuku šířit se rychleji a v konečném důsledku lépe vyzařovat (všechny vzorky měly

větší hodnoty akustické konstanty). Je potřeba dodat, že dřevo používané na výrobu hudebních nástrojů se vysušuje přírodní cestou a celý proces může trvat i několik let. Ze zjevných důvodů jsem však neměl k dispozici takové množství času, proto jsem zvolil umělé vysoušení pomocí klimatizace. Srovnání dřevěných materiálů s rozdílnou vlhkostí vzduchu obsahuje Tab. 3.45.

Tab. 3.45 Srovnání dřevěných materiálů s rozdílnou vlhkostí vzduchu

	Vzorek	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	$v$ [m·s <sup>-1</sup> ]	$E$ [MPa]	$Z$ [kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] · 10 <sup>-3</sup>	$K_A$ [m <sup>4</sup> ·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
Pokožkové podmínky	Bukový laminovaný panel s postranním lepením	630,0	4470,3	12589,9	2816,3	7,10
	MDF krytý hliníkovou fólií	821,0	2386,9	4677,2	1959,5	2,91
	MDF barvený – modrá	755,4	2153,1	3501,7	1626,4	2,85
	Vrstvené dřevo (LVL)	485,1	4529,9	9953,4	2197,3	9,34
	Překlička	669,8	4050,4	10988,9	2713,0	6,05
	Smrkový třívrstvý panel	458,2	4952,8	11240,4	2269,5	10,81
Snížená vlhkost (12 %)	Bukový laminovaný panel s postranním lepením	626,0	4508,5	12724,3	2822,3	7,20
	MDF krytý hliníkovou fólií	819,9	2430,9	4845,0	1993,1	2,96
	MDF barvený – modrá	754,3	2153,1	3496,5	1624,0	2,85
	Vrstvené dřevo (LVL)	484,6	4529,9	9944,3	2195,3	9,35
	Překlička	667,9	4082,0	11129,7	2726,5	6,11
	Smrkový třívrstvý panel	457,6	5048,1	11662,3	3008,1	11,03

## 4. Závěr

V bakalářské práci jsem objasnil jednu z metod, kterou se dají měřit akustické vlastnosti inovovaných materiálů na bázi dřeva. Inovovaných proto, protože nejsou běžně používány v hudebním průmyslu. Popsal jsem veličiny, které tyto hudební vlastnosti charakterizují a vysvětlil jsem, co je potřeba, aby materiál splňoval pro vydávání kvalitního, líbivého zvuku. S těmito znalostmi jsem mohl změřit hmotnosti a rozměry poskytnutých vzorků a za použití Fakopp ultrasonic metru změřit časy zvukových impulzů, které jimi procházely. Z těchto údajů jsem poté vypočítal veličiny popisující akustické (rezonanční, tlumící, ...) vlastnosti dřeva.

V teoretické části bakalářské práce jsem popsal vlastnosti rezonančních dřev základní parametry a kritéria, podle kterých se určuje, zda má strom rezonanční vlastnosti. Jedním z důležitých kritérií jsou chyby dřevin, které, většinou neblaze ovlivňují rezonanční kvality dřeva a je potřeba se jim při výběru vhodného stromu vyvarovat. Shrnujím kde se běžně vyskytují rezonanční stromy, jak u nás v ČR, tak ve zbytku Evropy a jaké prostředí je vhodné pro jejich růst. V další úseku teoretické části jsem pak specifikoval druhy rezonančních dřev a dřevěných materiálů, které se běžně používají pro výrobu hudebních nástrojů (nebo alespoň jejich částí) na dřevěné bázi.

Dále v práci jsem uvedl měřené materiály, popsal jejich výrobu a jak se běžně využívají. Následně došlo ke zhodnocení naměřených hodnot, které jsem později v kapitole 3.6 mezi sebou porovnal a posoudil jsem, které z měřených vzorků jsou nejlepší a nejhorší z rezonančního hlediska a které jsou lepší a horší z hlediska šíření zvuku. Jako nejlepší jsem v tomto směru považoval ty materiály, které měly největší hodnoty akustické konstanty a zároveň velký modul pružnosti. Mezi nejlepší rezonanční materiály se zařadily materiály s malou hustotou, například vzorky na bázi smrku (betonové bednění a třívrstvý smrkový panel – vzorky vhodné na stavbu rezonančních částí hudebních nástrojů) a nejhorší rezonanční vlastnosti měly všeobecně MDF s hustotou velkou. Na opačné straně, tedy z pohledu akustického vlnového odporu spolu s malým Youngovým modulem pružnosti a rychlostí zvuku šířícího se daným materiálem, jsem zvolil jako nejlepší všechny vzorky MDF a také překližky. Tyto jmenované dřevěné materiály jsou vhodné na použití v místech, kde je potřeba zvuk tlumit (reproduktorové ozvučnice, zvukotěsné a zvuk pohlcující obklady zdí apod.).

V poslední řadě jsem zkoumal vliv vlhkosti vzduchu na vlastnosti daných dřevěných materiálů. Vybrané vzorky z první části měření jsem umístil na dobu dvou týdnů do klimatizace a následně všechny znova proměřil. Výstupem měření bylo zjištění, že vlhkost vzduchu ovlivňuje celkovou hustotu dřeva a platí, že lepší hudební vlastnosti vykazuje dřevo, které je suché.

Celá tato měřicí metoda je založena na počítání mnoha akustických veličin založených na jedině nepřímě změřené veličině – rychlosti (měří se čas, ze kterého lze počítat průměrnou rychlost). Jedná se sice o metodu nenáročnou na provedení (pokud máte k dispozici potřebná měřicí zařízení), ale stačí změřit špatný údaj a celé měření bude rovněž špatné.



## 5. Seznam použitých zdrojů

- [1] Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., Babiak, M: Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vyd. Bratislava: Príroda, 1997 485 s. ISBN 80-07-00960-4
- [2] Vnitřní výpočtové teploty dle ČSN EN 12831 a doporučené relativní vlhkosti vzduchu dle ČSN 06 0210 - TZB-info. *TZB-info - stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov* [online]. Praha: Topinfo s.r.o, 2001 [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/28-vnitri-vypoctove-teploty-dle-csn-en-12831-a-doporucene-relativni-vlhkosti-vzduchu-dle-csn-06-0210>
- [3] Beech edge-glued laminated panel: sample, properties, application, dimensions, manufacturer. *Musterkiste.com: materials database for wood species and wood-based materials* [online]. Berlin: Eckhard Klopp & Christian Schloh GbR, 2011 [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <http://www.musterkiste.com/en/holz/pro/2503,0.html>
- [4] Concrete shuttering panel: sample, properties, application, dimensions, manufacturer. *Musterkiste.com: materials database for wood species and wood-based materials* [online]. Berlin: Eckhard Klopp & Christian Schloh GbR, 2011 [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <http://www.musterkiste.com/en/holz/pro/2524,0.html>
- [5] MDF with aluminium foil facing : sample, properties, application, dimensions, manufacturer. *Musterkiste.com: materials database for wood species and wood-based materials* [online]. Berlin: Eckhard Klopp & Christian Schloh GbR, 2011 [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <http://www.musterkiste.com/en/holz/pro/3918,0.html>
- [6] Acetylated wood : sample, properties, application, dimensions, manufacturer. *Musterkiste.com: materials database for wood species and wood-based materials* [online]. Berlin: Eckhard Klopp & Christian Schloh GbR, 2011 [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <http://www.musterkiste.com/en/holz/pro/3918,0.html>
- [7] MDF coloured orange : sample, properties, application, dimensions, manufacturer. *Musterkiste.com: materials database for wood species and wood-based materials* [online]. Berlin: Eckhard Klopp & Christian Schloh GbR, 2011 [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <http://www.musterkiste.com/en/holz/pro/3931,0.html>
- [8] MDF coloured blue : sample, properties, application, dimensions, manufacturer. *Musterkiste.com: materials database for wood species and wood-based materials* [online]. Berlin: Eckhard Klopp & Christian Schloh GbR, 2011 [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <http://www.musterkiste.com/en/holz/pro/3923,0.html>
- [9] Laminated veneer lumber LVL : sample, properties, application, dimensions, manufacturer. *Musterkiste.com: materials database for wood species and wood-based materials* [online]. Berlin: Eckhard Klopp & Christian Schloh GbR, 2011 [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <http://www.musterkiste.com/en/holz/pro/1501,0.html>
- [10] Plywood : sample, properties, application, dimensions, manufacturer. *Musterkiste.com: materials database for wood species and wood-based materials* [online]. Berlin: Eckhard Klopp & Christian Schloh GbR, 2011 [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <http://www.musterkiste.com/en/holz/pro/2056,0.html>
- [11] Birch plywood, brown phenolic film finish : sample, properties, application, dimensions, manufacturer. *Musterkiste.com: materials database for wood species and wood-based materials* [online]. Berlin: Eckhard Klopp & Christian Schloh GbR, 2011 [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <http://www.musterkiste.com/en/holz/pro/2006,0.html>
- [12] Bamboo rod panel : sample, properties, application, dimensions, manufacturer. *Musterkiste.com: materials database for wood species and wood-based materials* [online]. Berlin: Eckhard Klopp & Christian Schloh GbR, 2011 [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <http://www.musterkiste.com/en/holz/pro/2502,0.html>

- [13] MDF, general information : sample, properties, application, dimensions, manufacturer. Musterkiste.com: materials database for wood species and wood-based materials [online]. Berlin: Eckhard Klopp & Christian Schloh GbR, 2011 [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <http://www.musterkiste.com/en/holz/pro/3928,0.html>
- [14] Chipboard : sample, properties, application, dimensions, manufacturer. Musterkiste.com: materials database for wood species and wood-based materials [online]. Berlin: Eckhard Klopp & Christian Schloh GbR, 2011 [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <http://www.musterkiste.com/en/holz/pro/3301,0.html>
- [15] Beech pywood, fire-retardant : sample, properties, application, dimensions, manufacturer. Musterkiste.com: materials database for wood species and wood-based materials [online]. Berlin: Eckhard Klopp & Christian Schloh GbR, 2011 [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <http://www.musterkiste.com/en/holz/pro/2018,0.html>
- [16] Vapour permeable, medium density fibreboard : sample, properties, application, dimensions, manufacturer. Musterkiste.com: materials database for wood species and wood-based materials [online]. Berlin: Eckhard Klopp & Christian Schloh GbR, 2011 [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <http://www.musterkiste.com/en/holz/pro/3401,0.html>
- [17] Příspěvatelé Wikipedie, *Dřevo* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2019, Datum poslední revize 14. 11. 2019, 11:35 UTC, [cit. 19-12-2019]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=D%C5%99evo&oldid=17850104>
- [18] Ve žďárských vrších roste rezonanční dřevo. Hodí se na ozvučné desky klavírů | Vysočina. Český rozhlas Vysočina [online]. Copyright © 1997 [cit. 06.06.2020]. Dostupné z: <https://vysočina.rozhlas.cz/ve-zdarskych-vrsich-roste-rezonancni-drevo-hodi-se-na-ozvucne-desky-klaviru-8111938>
- [19] Prodej řeziva ořechu a ovocných dřevin. 302 Found [online]. Copyright © Václav Šámal 2010 [cit. 06.06.2020]. Dostupné z: <http://www.ovocne-drevo.cz/rezonancni/index.php>
- [20] Jak poznat rezonanční dřevo aneb O dřevě tentokrát z hudební stránky - Magazinzahrada.cz. Magazinzahrada.cz - Magazín zahrada přináší vše o zahradách, zahradním nábytku a nářadí, o bazénech, jezírkách, květinách a okrasných dřevinách [online]. Dostupné z: <https://www.magazinzahrada.cz/jak-poznat-rezonancni-drevo-aneb-o-dreve-tentokrat-z-hudebni-stranky-2/>
- [21] Konec staleté tradice. Dřevo na hudební nástroje došlo | Týden.cz. Týden.cz - Aktuální zpravodajství v souvislostech [online]. Copyright © 2006 EMPRESA MEDIA, a.s. Publikování či další šíření obsahu těchto webových stránek bez písemného souhlasu vedení internetové redakce časopisu Týden je zakázáno. Kompletní pravidla využívání obsahu najdete [cit. 06.06.2020]. Dostupné z: [https://www.tyden.cz/rubriky/byz-nys/cesko/konec-stalete-tradice-drevo-na-hudebni-nastroje-doslo\\_374440.html](https://www.tyden.cz/rubriky/byz-nys/cesko/konec-stalete-tradice-drevo-na-hudebni-nastroje-doslo_374440.html)
- [22] Dřevo na stavbu hudebních nástrojů - muzikus.cz. muzikus.cz hudební portál [online]. Dostupné z: <http://www.muzikus.cz/pro-muzikanty-clanky/Drevo-na-stavbu-hudebnich-nastroju-18~cervenec~2004/>
- [23] Konstrukce ozvučnice reprosoustavy | Konstrukce - teorie | DEXON | REPRODUKTORY A OZVUČOVACÍ TECHNIKA. DEXON | REPRODUKTORY A OZVUČOVACÍ TECHNIKA [online]. Dostupné z: <https://www.dexon.cz/clanky/konstrukce-teorie/konstrukce-ozvucnice-reprosoustavy.html>
- [24] ReproMania.NET | Teorie | Stavba ozvučnic. ReproMania.NET | Úvodní stránka - audio, reproduktory, zesilovače, Tesla [online]. Copyright © LuKys 2005 [cit. 06.06.2020]. Dostupné z: <http://repromania.net/teorie/stavba-ozvucnic.php>

[25] Příspěvatelé Wikipedie, Kytara [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2020, Datum poslední revize 28. 05. 2020, 08:55 UTC, [citováno 6. 06. 2020] Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Kytara&ol-did=18560312>

## 6. Seznam použitých zkratek, veličin a symbolů

### 6.1 Zkratky

MDF – Medium density fibreboard

LVL – Laminated veneer lumber

FFT – Fast Fourier transformation

### 6.2 Veličiny a symboly

Symbol	Název	Jednotka
$m$	Hmotnost	kg
$t$	Čas	s
$v$	Rychlost	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
$V$	Objem	$\text{m}^3$
$\rho$	Hustota	$\text{kg}\cdot\text{m}^3$
$E$	Youngův modul pružnosti	Pa
$Z$	Akustický odpor	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
$K_A$	Akustická konstanta	$\text{m}^4\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$

## 7. Seznam obrázků

Obr. 3.1 Záznam měření doby od vyslání k záznamu impulsu pomocí timeru .....	14
Obr. 3.2 Bukový laminovaný panel.....	17
Obr. 3.3: Betonové bednění .....	18
Obr. 3.4: MDF krytý hliníkovou fólií .....	19
Obr. 3.5: Acetylované dřevo.....	20
Obr. 3.6: MDF barvený – oranžová .....	21
Obr. 3.7: MDF barvený – modrá.....	22
Obr. 3.8: Vrstvené dřevo LVL.....	23
Obr. 3.9: Překližka .....	24
Obr. 3.10: Březová překližka s fenolickou fólií .....	25
Obr. 3.11: Bambusový panel .....	26
Obr. 3.12: MDF (medium density fibreboard).....	27
Obr. 3.13: Dřevotřísky .....	28
Obr. 3.14: Buková překližka.....	29
Obr. 3.15: Smrkový třívrstvý panel.....	30
Obr. 3.16: Paropropustný MDF .....	31
Obr. 3.17: Graf závislosti hustoty vzorků na rychlosti zvuku šířícího se vzorky .....	35
Obr. 3.18: Graf závislosti Youngova modulu pružnosti na akustické konstantě měřených vzorků .....	36

## 8. Seznam tabulek

Tab. 3.1: Změřené hodnoty pro laminovaný bukový panel .....	17
Tab. 3.2: Vypočítané hodnoty pro laminovaný bukový panel.....	17
Tab. 3.3: Změřené hodnoty pro betonové bednění.....	18
Tab. 3.4: Vypočítané hodnoty pro betonové bednění .....	18
Tab. 3.5: Změřené hodnoty pro MDF krytý hliníkovou fólií .....	19
Tab. 3.6: Vypočítané hodnoty pro MDF krytý hliníkovou fólií .....	19
Tab. 3.7: Změřené hodnoty pro acetylované dřevo.....	20
Tab. 3.8: Vypočítané hodnoty pro acetylované dřevo .....	20
Tab. 3.9: Změřené hodnoty pro MDF barvený – oranžová .....	21
Tab. 3.10: Vypočítané hodnoty pro MDF barvený – oranžová.....	21
Tab. 3.11: Změřené hodnoty pro MDF barvený – modrá .....	22
Tab. 3.12: Vypočítané hodnoty pro MDF barvený – modrá.....	22
Tab. 3.13: Změřené hodnoty pro vrstvené dřevo (LVL) .....	23
Tab. 3.14: Vypočítané hodnoty pro vrstvené dřevo (LVL).....	23
Tab. 3.15: Změřené hodnoty pro překližku .....	24
Tab. 3.16: Vypočítané hodnoty pro překližku .....	24
Tab. 3.17: Změřené hodnoty pro březovou překližku s fenolickou fólií.....	25
Tab. 3.18: Vypočítané hodnoty pro březovou překližku s fenolickou fólií.....	25
Tab. 3.19: Změřené hodnoty pro bambusový panel .....	26
Tab. 3.20: Vypočítané hodnoty pro bambusový panel .....	26
Tab. 3.21: Změřené hodnoty pro MDF (medium density fibreboard) .....	27
Tab. 3.22: Vypočítané hodnoty pro MDF (medium density fibreboard).....	27
Tab. 3.23: Změřené hodnoty pro dřevotřísku .....	28
Tab. 3.24: Vypočítané hodnoty pro dřevotřísku .....	28
Tab. 3.25: Změřené hodnoty pro bukovou překližku .....	29

Tab. 3.26: Vypočítané hodnoty pro bukovou překližku .....	29
Tab. 3.27: Změřené hodnoty pro smrkový třívrstvý panel .....	30
Tab. 3.28: Vypočítané hodnoty pro smrkový třívrstvý panel .....	30
Tab. 3.29: Změřené hodnoty pro paropropustný MDF .....	31
Tab. 3.30: Vypočítané hodnoty pro paropropustný MDF .....	31
Tab. 3.31: Změřené hodnoty pro laminovaný bukový panel (snížená vlhkost) .....	32
Tab. 3.32: Vypočítané hodnoty pro laminovaný bukový panel (snížená vlhkost) .....	32
Tab. 3.33: Změřené hodnoty pro MDF krytý hliníkovou fólií (snížená vlhkost) .....	32
Tab. 3.34: Vypočítané hodnoty pro MDF krytý hliníkovou fólií (snížená vlhkost) .....	32
Tab. 3.35: Změřené hodnoty pro MDF barvený – modrá (snížená vlhkost) .....	33
Tab. 3.36: Vypočítané hodnoty pro MDF barvený – modrá (snížená vlhkost) .....	33
Tab. 3.37: Změřené hodnoty pro vrstvené dřevo (LVL) (snížená vlhkost) .....	33
Tab. 3.38: Vypočítané hodnoty pro vrstvené dřevo (LVL) (snížená vlhkost) .....	33
Tab. 3.39: Změřené hodnoty pro březovou překližku s fenolickou fólií (snížená vlhkost) .....	34
Tab. 3.40: Vypočítané hodnoty březovou překližku s fenolickou fólií (snížená vlhkost) .....	34
Tab. 3.41: Změřené hodnoty pro smrkový třívrstvý panel (snížená vlhkost) .....	34
Tab. 3.42: Vypočítané hodnoty pro smrkový třívrstvý panel (snížená vlhkost) .....	34
Tab. 3.43: Porovnání změřených hodnot všech vzorků (pokožové podmínky) .....	35
Tab. 3.44: Porovnání možných využití měřených vzorků .....	37
Tab. 3.45: Srovnání dřevěných materiálů s rozdílnou vlhkostí vzduchu .....	38